

CIRCULAR TÉCNICA

38

Planaltina, DF
Dezembro, 2018

Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo

Iêda Carvalho Mendes
Djalma Martinhão Gomes de Sousa
Fábio Bueno dos Reis Junior
André Alves de Castro Lopes



Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo¹

Saúde do solo

O conceito de saúde ou de qualidade do solo está relacionado à sua capacidade de funcionar para fornecer importantes serviços ambientais, entre os quais: manter a capacidade de produção biológica (produção de grãos, carne, madeira, agroenergia, fibras, etc), promover a saúde das pessoas, plantas e animais (solos saudáveis, ambientes saudáveis) e também de preservar a qualidade ambiental (armazenando e filtrando água, sequestrando carbono, etc). Um aspecto importante desse conceito é reforçar que a saúde do solo vai além da sua capacidade de produção de grãos, carne, madeira, agroenergia, fibras. Ou seja, é possível ter um solo com baixa qualidade, mas cujas elevadas produtividades estejam relacionadas a entradas de insumos em doses muito acima das recomendadas para solos bem manejados, uma condição que não é sustentável em longo prazo, pois pode resultar em contaminações do ambiente e prejuízos aos agricultores.

No contexto de um mundo de população crescente, concentrada em cidades e que se encontra num processo de envelhecimento, o maior desafio para a agricultura do século 20 consiste em aumentar a produção de alimentos baratos e saudáveis, com lucratividade e a um baixo custo ambiental e social. A superação desse desafio passa obrigatoriamente pela manutenção da saúde dos solos.

O solo é a base de todos os sistemas de produção de alimentos, fibras, produtos florestais e agroenergia. É também o alicerce para a construção de nossas casas, cidades, indústrias, hospitais e estradas. Além de sua extrema importância nas questões relacionadas à segurança alimentar, o solo abriga a maior biodiversidade do planeta e é também o maior filtro e tanque de armazenamento de água do mundo. Sua capacidade de armazenar e estocar

¹ Iêda de Carvalho Mendes, engenheira-agrônoma, Ph.D. em Microbiologia do Solo, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF; Djalma Martinhão Gomes de Sousa, químico, mestre em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF; Fábio Bueno dos Reis Junior, engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Microbiologia do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF; André Alves de Castro, engenheiro-agrônomo, doutorando da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

carbono o torna fundamental na discussão de todas as questões relacionadas às emissões de gases de efeito estufa. Em 2015, quando se comemorou o ano internacional do solo, um balanço divulgado pela FAO (2015) revelou que 33% dos solos do mundo estão em estados de moderada a alta degradação, sendo as principais causas a erosão, a perda de matéria orgânica do solo (MOS), o desbalanço de nutrientes e compactação. Esse dado demonstra como o crescimento populacional e a busca de melhoria de vida, sem a preocupação com o ambiente, pressionam a base de recursos naturais do planeta Terra.

A despeito da importância do solo para a humanidade, o interesse pelo tema *Qualidade ou Saúde do solo* é relativamente recente, datando do fim da década de 1980 e início da década de 1990, e inovou ao destacar além da importância do solo para a produção de alimentos, a importância desse recurso para o funcionamento global dos ecossistemas. O funcionamento do solo, por sua vez, está ligado aos seus aspectos de química, física e biologia, sendo a maquinaria biológica o componente que move todas essas engrenagens (Figura 1).

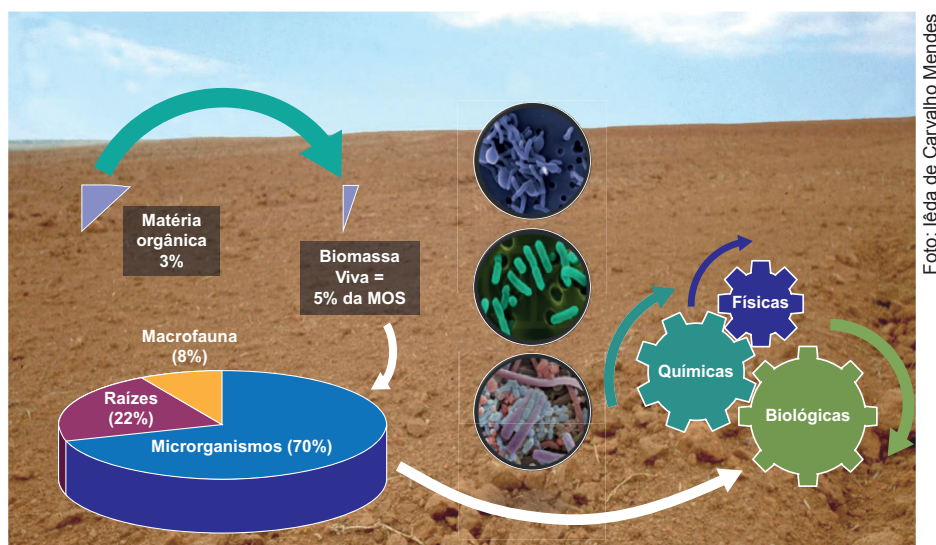


Figura 1. Representação esquemática da maquinaria biológica, no contexto de um solo com 3% de MOS. Embora, em termos numéricos, a maquinaria biológica represente, em média, apenas 5% da MOS, ela é a principal responsável pelo funcionamento do solo.

A maquinaria biológica do solo

A maquinaria biológica do solo é constituída por microrganismos (cerca de 70%), raízes e fauna e apresenta uma estreita inter-relação com os componentes físicos e químicos, os quais influenciam em conjunto não só a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, mas também suas funções ecológicas e serviços ambientais (Figura 1).

Embora a afirmação de que os microrganismos controlem o mundo pareça um pouco exagerada, não é. Grande parte dos processos responsáveis pela vida na Terra depende da atividade microbiana. Trata-se de um verdadeiro universo paralelo e pouco conhecido, uma vez que a maior parte das espécies microbianas não cresce em meios de cultura nos laboratórios. Por exemplo, um único grama de solo possui cerca de um bilhão de bactérias, um milhão de actinomicetos e 100 mil fungos. Em termos de número de espécies por grama de solo, os números variam de 2.000 a 8,3 milhões (Schloss; Handelsman, 2006). Independente do grau de conservadorismo da estimativa utilizada, esses valores dão uma ideia da imensa diversidade genética e metabólica das comunidades microbianas do solo e, conseqüentemente, da diversidade de processos em que elas atuam. Como disse certa vez o célebre cientista Louis Pasteur (1822-1896), *a importância dos infinitamente pequenos é infinitamente grande*.

Os aspectos relacionados ao funcionamento biológico constituem a fronteira menos explorada e, portanto, mais desconhecida do solo. Felizmente, dispomos de alguns indicadores microbiológicos (aqui denominados bioindicadores), que nos auxiliam nessa importante tarefa.

Bioindicadores de saúde do solo

Entre os parâmetros utilizados para caracterizar o componente biológico dos solos e avaliar a sua saúde/qualidade, destacam-se as avaliações de biomassa microbiana e de atividade enzimática.

A biomassa microbiana do solo, como o próprio nome diz, avalia a massa dos microrganismos no solo e é expressa como mg de C, N, e/ou P nos microrganismos por quilograma de solo. A biomassa é a parte viva e mais ativa da

MOS sendo constituída, principalmente, por fungos, bactérias e actinomicetos. Apesar da sua importância em relação ao teor total de MOS, o tamanho dos componentes vivos é relativamente pequeno (Figura 1), variando de 1% a 5% (Smith; Paul, 1990). No Sul do Brasil, o carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM, respectivamente) constituem-se em bioindicadores capazes de detectar as diferenças entre o sistema de plantio direto (SPD) e o sistema de preparo convencional (SPC) (Hungria et al., 2009; Silva et al., 2010; Souza et al., 2014). Entretanto, na região do Cerrado, nem sempre esse parâmetro é capaz de detectar diferenças entre sistemas de manejo contrastantes (Peixoto et al., 2010; Silva et al., 2010).

No solo, as enzimas participam como catalizadoras das reações metabólicas intracelulares, que ocorrem nos seres vivos. Além disso, as enzimas extracelulares desempenham papel fundamental, atuando em várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos (ligninases, celulases, proteases, glucosidases, galactosidases), ciclagem de nutrientes (fosfatases, amidases, urease, sulfatase), formação da MOS e da estrutura do solo. O potencial das análises de atividade enzimática como indicadores de grande sensibilidade, especialmente β -glicosidase e arilsulfatase, tem sido verificado no Cerrado (Mendes et al., 2003; Green et al., 2007; Peixoto et al., 2010) e no Sul do País (Balota et al., 2004; Lisboa et al., 2012; Mendes et al., 2015a).

Por que avaliar os bioindicadores?

A maior vantagem dos bioindicadores é que eles são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos, detectando com maior antecedência alterações que ocorrem no solo, em função do seu uso e manejo (Matsuoka et al., 2003; Mendes et al., 2003; Balota et al., 2004; Hungria et al., 2009; Peixoto et al., 2010; Lisboa et al., 2012).

No Brasil, a percepção da necessidade da inclusão dos bioindicadores nas avaliações de rotina do solo coincidiu com adoção de sistemas conservacionistas de manejo, como o SPD, a integração lavoura-pecuária (ILP) e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Ao longo dos últimos 15 anos, um grande número de dados de pesquisa e de relatos de produtores demonstravam que nem sempre as alterações nas propriedades químicas, em particular

os teores de MOS, eram capazes de identificar as modificações que ocorriam no solo em função da adoção desses manejos conservacionistas.

Nos dados das Tabelas 1 e 2, observa-se a maior sensibilidade dos bioindicadores frente a outros atributos de forma bem didática. Esses dados são oriundos de um experimento localizado no Centro Tecnológico da Cooperativa Comigo, na cidade de Rio Verde, importante polo de desenvolvimento agrícola do sudoeste goiano (Mendes et al., 2015b). Nesse experimento, são avaliados sistemas de produção de grãos com e sem a presença de gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária). O solo na área experimental é um Latossolo Vermelho (LV) franco-argiloso que havia sido cultivado para produção de grãos por mais de 10 anos antes do estabelecimento do experimento em 2006. O delineamento experimental é de blocos ao acaso, com quatro repetições, em SPD. Foram avaliados os seguintes tratamentos: (a) soja/milho safrinha/pousio; (b) soja/*Urochloa brizantha* cv. Marandu e (c) soja/milho intercalado com *Urochloa ruziziensis*.

Em dezembro de 2014, oito anos após o início do experimento, foi realizada uma coleta de solo, na fase de floração da soja, na profundidade de 0 cm a 10 cm, em que foram determinadas as propriedades químicas do solo e os teores de matéria orgânica (Tabela 1). Além desses atributos que fazem parte da análise tradicional de solo, foram avaliadas as atividades das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase, fosfatase ácida e determinados os teores de C e N da biomassa microbiana (Tabela 2).

Tabela 1. Propriedades químicas e matéria orgânica (MOS) de um LV de Cerrado, sob SPD, em sistemas agrícolas com e sem braquiaria (0 cm a 10 cm), no sudoeste goiano.

Tratamento	pH	Al	Ca	Mg	K	P	MOS
		----- cmol _c /dm ³ -----			---- mg/dm ³ ----		g/kg
Soja/Milho	5,87	0,04	4,22	1,39	113	12,7	22,0 b
Soja/Milho + <i>U. ruziziensis</i>	5,89	0,03	4,48	1,96	108	10,1	24,7 a
Soja/ <i>U. brizantha</i>	6,06	0,04	4,57	1,55	141	13,8	24,1 ab
CV(%)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	6

Ca, Mg e Al: extrator (KCl 1 mol/L; P e K: extrator Mehlich-1; MOS:método Walkley &Black.

Tabela 2. Indicadores microbiológicos de um LV de Cerrado, sob SPD, em sistemas agrícolas com e sem braquiaria (0 cm a 10 cm), no sudoeste goiano.

Tratamento	β -Glicosidase	Sulfatase	Fosfatase	CBM	NBM
	----- mg de p-nitrofenol/kg de solo/h -----			--- mg/kg solo ---	
Soja/Milho	108 c	89 b	494 b	311	57
Soja/Milho + <i>U. ruziziensis</i>	151 b	132 a	608 ab	320	60
Soja/ <i>U. brizantha</i>	179 a	140 a	684 a	270	50
CV(%)	12	12	14	21(ns)	19 (ns)

CBM, NBM= carbono da biomassa microbiana, nitrogênio da biomassa microbiana.

Na Tabela 1, verifica-se que os tratamentos não diferiram quanto às propriedades químicas avaliadas na profundidade de 0 cm a 10 cm e que a diferença entre o maior e o menor valor de MOS foi próxima de 12%. Entretanto, nos tratamentos com presença de braquiária, foram verificados elevados níveis de atividade das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida (Tabela 2). Em relação ao tratamento soja/milho sem planta de cobertura, nos tratamentos com braquiárias, esses aumentos foram de 53% para a β -glicosidase e arilsulfatase e de 30% para a enzima fosfatase ácida. Isto é, embora os três tratamentos apresentassem características químicas similares, os maiores níveis de β -glicosidase e arilsulfatase nos tratamentos com braquiária demonstraram que o funcionamento biológico do solo era distinto. Não por acaso, estudos anteriores realizados nesse mesmo experimento reportaram um aumento de produtividade da soja nos tratamentos com braquiária da ordem de 572 kg/ha (Benites et al., 2014).

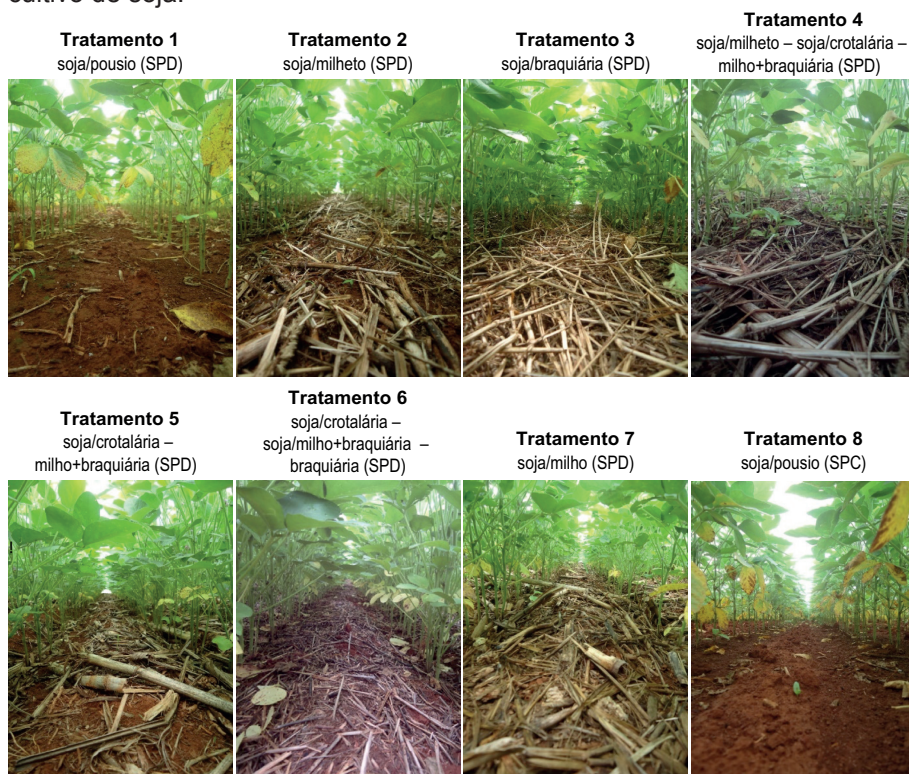
Três conclusões podem ser obtidas a partir desse conjunto de dados:

- a) A capacidade das braquiárias em manter um solo biologicamente mais ativo (mais saudável) nas condições do Cerrado.
- b) A sensibilidade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase para detectar essas alterações.
- c) As características químicas do solo não permitiram diferenciar as áreas com e sem braquiária.

Todas as três conclusões demonstram a importância dos bioindicadores para avaliar a saúde/qualidade do solo.

Por que manter o solo biologicamente ativo?

Solos biologicamente mais ativos também são mais produtivos. Outro exemplo que ilustra bem essa afirmação é o do experimento de rotação de culturas na soja, conduzido desde 2008 pela Fundação MT, na estação experimental Cachoeira, município de Itiquira, MT. Nesse experimento, são avaliados oito sistemas de cultivos/produção incluindo o monocultivo, sucessão e rotação de culturas. Na Figura 2, é possível visualizar as diferenças entre os tratamentos, com base na cobertura do solo pelos resíduos vegetais, no oitavo cultivo de soja.



Fotos: Fabio Ono

Figura 2. Aspecto visual da cobertura do solo nos tratamentos do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira, MT (SPD – Sistema de plantio direto; SPC – Sistema de preparo convencional).

Até a safra 2013/2014, as diferenças nas produtividades da soja entre os vários tratamentos não foram muito acentuadas. A produtividade média do pior tratamento, em termos de manejo (monocultivo de soja sob SPC) foi de 61 sc/ha e não diferiu significativamente dos demais tratamentos (Mendes et al., 2017). No entanto, no sétimo cultivo (2014/2015), com o uso de uma cultivar superprecoce (TMG 7262 RR cujo ciclo foi de 98 dias), a ocorrência de um veranico em janeiro de 2015 possibilitou evidenciar, pela primeira vez, o início do declínio dos tratamentos com monocultivo de soja. Na Figura 3, ilustra-se o aspecto geral da soja no tratamento 1 (soja/pousio) e no tratamento 3, em que a cultura é inserida num esquema de sucessão com a braquiária (*U. ruziziensis*), durante o veranico de janeiro de 2015. No tratamento com soja/pousio, a produtividade de grãos foi de 29 sc/ha, enquanto, no tratamento soja/braquiária, a produtividade de grãos foi de 59 sc/ha, ou seja, diferença de 30 sc/ha entre os dois tratamentos. Entretanto, apesar da diferença significativa na produtividade de grãos, as características químicas dos solos (0 cm a 10 cm) desses tratamentos foram semelhantes (Tabela 3). A única exceção foi a MOS cujo teor no tratamento com braquiária foi 1,5 vezes maior que no tratamento soja/pousio, ou seja, 50% a mais em razão da presença dessa planta de cobertura. A semelhança entre as características químicas do solo nos dois tratamentos mostra a insuficiência do conceito mineralista (baseado apenas nos teores absolutos dos nutrientes no solo) para explicar resultados como esses. Áreas com teores semelhantes de nutrientes, mas com produtividades de grãos distintas, evidenciam a importância do componente biológico do solo.

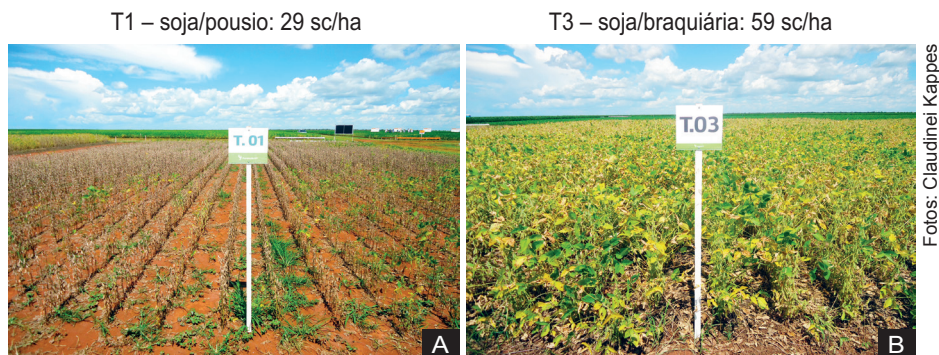


Figura 3. Aspecto visual do desenvolvimento da soja (cv. TMG 7262 RR) no veranico da safra 2014/2015, após sete safras consecutivas de monocultivo (a) e em sucessão com braquiária (b) sob SPD, em Itiquira, MT.

Tabela 3. Propriedades químicas do solo, na camada de 0 a 10 cm, nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira – MT (safra 2015/2016).

Tratamento	MOS	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	P	K
	g/kg	H ₂ O	-----	cmolc/dm ³	-----	-----	--- mg/dm ³ ---	---
Soja/pousio	28,2	6,3	0,0	3,0	3,8	2,2	15	131
Soja/braquiária	42,3	6,4	0,0	2,5	4,4	3,1	16	151

MOS – matéria orgânica do solo (Walkley & Black); H+Al (acetato de cálcio a pH 7,0); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol/L); P e K (Mehlich-1).

Na Tabela 4, são apresentados, para os dois tratamentos mencionados anteriormente (soja/pousio e soja/braquiária, ambos em SPD), os valores de CBM e de atividade de três enzimas do solo associadas aos ciclos do carbono (β -glicosidase), fósforo (fosfatase ácida) e enxofre (arilsulfatase) determinados na safra 2015/2016. As amostras de solo foram coletadas na fase de florescimento da soja (dezembro de 2015) e analisadas no laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF. Em relação ao tratamento com monocultivo de soja em PD, o tratamento soja/braquiária apresentou 3,0 vezes mais CBM e 4,0, 8,0 e 1,7 vezes mais atividades de β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida, respectivamente.

Tabela 4. Biomassa e atividade enzimática do solo na camada de 0 m a 10 cm nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária sob SPD do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira, MT (safra 2015/2016).

Bioindicador ¹	Soja/pousio	Soja/braquiária	Diferença
CBM	131	410	3,0 vezes
β -Glicosidase	64	233	4,0 vezes
Arilsulfatase	28	223	8,0 vezes
Fosfatase ácida	589	1.005	1,7 vezes

¹ Valores de CBM (carbono da biomassa microbiana) expressos em mg de C/kg de solo; valores de atividade de β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de *p*-nitrofenol/kg de solo/h.

Conforme verificado no exemplo de Rio Verde, esses resultados mostram que, embora as duas áreas apresentassem características químicas semelhantes, o componente biológico era completamente distinto. O solo biologicamente mais ativo, por meio da inserção da braquiária no sistema de pro-

dução, foi também o mais produtivo. No caso em questão, a estabilidade produtiva do sistema de sucessão de culturas foi mantida pelo aporte de palhada proveniente do uso da braquiária e seus benefícios ao longo do tempo, enquanto, no tratamento sob monocultivo, a ausência de palhada na superfície culminou em visível perda de vigor da soja. Esses dados também demonstram que o solo sob braquiária foi mais tamponante, estável e resiliente, ou seja, suportou melhor uma situação de estresse quando comparado ao solo com o monocultivo.

Considerando que esse experimento foi iniciado na safra 2008/2009, a bioanálise do solo realizada em 2015 evidenciou a sensibilidade dos bioindicadores CBM, arilsulfatase e β -glicosidase para detectar mudanças nos sistemas de manejo, com diferenças bem mais acentuadas que as observadas nos teores de MOS (diferença de 1,5 vezes entre os tratamentos soja/pousio e soja/braquiária, ambos em SPD). Esses resultados confirmam também que na escalada da melhoria de um solo, os atributos microbiológicos são os primeiros a serem impactados (Figura 4). Maior aporte de resíduos vegetais resulta inicialmente em mais atividade biológica e, com o passar do tempo, mais MOS, mais ciclagem de nutrientes, maior estruturação e agregação do solo, resultando em maior retenção de água. Provavelmente, após oito safras consecutivas, as melhorias na estruturação do solo proporcionadas pelo cultivo de braquiária, favoreceram a maior retenção de água, diminuindo os severos efeitos causados pelo veranico na safra 2014/2015. Esses fatores resultam em melhores desempenhos em termos de produtividade (principalmente em condições de estresses abióticos) e em maior eficiência no uso de insumos, resultando em maiores lucratividades.

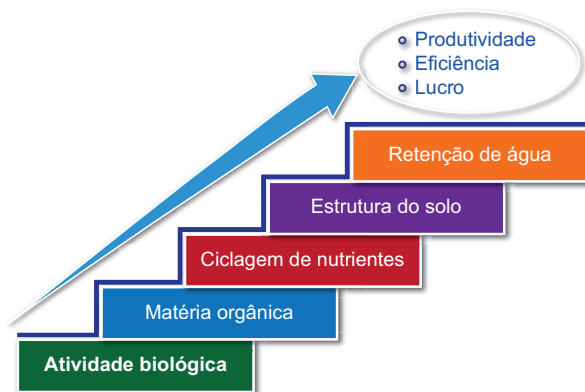


Figura 4. Em função do aumento no aporte de resíduos vegetais ao solo, o aumento na atividade biológica é o primeiro degrau na escalada da melhoria de um solo.

Fonte: Adaptado de Hatfield, 2017.

Bioanálise do solo: estado da arte da pesquisa

A bioanálise do solo consiste na determinação de alguns indicadores ligados ao seu funcionamento biológico. Um dos grandes desafios que precisava ser superado para o uso de bioindicadores nas avaliações de qualidade de solo era a dificuldade para interpretação dos valores individuais desses parâmetros. Ou seja, ainda não haviam sido definidos valores que pudessem separar solos com diferentes condições de qualidade e sustentabilidade.

Diferentemente do que ocorre com os indicadores químicos de fertilidade, cujos níveis (baixo, médio, adequado e alto) já estão bem definidos para cada elemento e tipo de solo (sempre levando em consideração características como: textura, teor de MOS, etc.), até recentemente era difícil simplesmente medir e interpretar bioindicadores, independentemente de um controle ou referencial de comparação.

Visando auxiliar na interpretação individual dos bioindicadores, o grupo de pesquisa em microbiologia do solo da Embrapa Cerrados elaborou uma estratégia para interpretação de bioindicadores, utilizando os princípios dos ensaios de calibração de nutrientes (Lopes et al., 2013). A proposta foi desenvolvida a partir de três experimentos de campo de longa duração e baseou-se nas relações dos bioindicadores com o rendimento acumulado de grãos (RAG) de soja e milho e com os teores de MOS. Todos os atributos microbiológicos foram correlacionados positivamente com o RAG e com a MOS. Assim, por meio de análises de regressão, foi possível delimitar classes de suficiência para os bioindicadores, gerando tabelas de interpretação.

Para os Latossolos argilosos de cerrado sob cultivos anuais, já dispomos de três tabelas de interpretação dos bioindicadores. Duas dessas tabelas são específicas para serem utilizadas quando as amostras de solo são coletadas no período chuvoso (Lopes et al., 2018; Mendes et al., in press), sendo uma para cultivos anuais sob plantio direto (Tabela 5) e outra para solos sob plantio convencional (Tabela 6).

Essas duas tabelas foram geradas com amostras de solo coletadas na fase de florescimento das culturas (na metade no período chuvoso), mantidas na umidade natural do solo e rapidamente transportadas e processadas em laboratório. Porém, essa época coincide com um período de elevada demanda de trabalhos na lavoura e com a cultura estabelecida em máximo desenvolvi-

mento, o que, na prática, dificultaria a coleta e o envio dessas amostras para o laboratório (Mendes et al., 2015a). Para que o produtor pudesse unificar as amostragens para microbiologia e fertilidade e para que os laboratórios comerciais de análises de solo pudessem unificar os processos de preparação das amostras (secagem à temperatura ambiente e peneiramento), foi desenvolvido o conceito de amostra de solo Fertbio (para fertilidade química e biológica do solo). Esse conceito propõe a unificação da época de amostragem de solo para a análise química e microbiológica (ambas realizadas na fase de pós-colheita) e também dos procedimentos de pré-tratamento das amostras (com secagem do solo ao ar antes da realização das análises de laboratório).

Tabela 5. Classes de interpretação de bioindicadores para Latossolos Vermelhos argilosos de cerrado, sob cultivos anuais em plantio direto, na camada de 0 cm a 10 cm, específica para amostras de solo coletadas no período chuvoso.

Bioindicador ¹	Classe de interpretação		
	Baixo	Moderado	Adequado
CBM	≤ 245	246-440	> 440
β-Glicosidase	≤ 90	91-225	> 225
Sulfatase	≤ 25	26-145	> 145
Fosfatase Ácida	≤ 700	701-1.260	> 1.260

¹ Valores de CBM expressos em mg de C/kg de solo; valores de atividade de β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de *p*-nitrofenol/kg de solo/h.

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2018).

Tabela 6. Classes de interpretação de bioindicadores para Latossolos Vermelhos argilosos de cerrado, sob cultivos anuais em plantio convencional, na camada de 0 cm a 10 cm, específica para amostras de solo coletadas na fase de floração.

Bioindicador ¹	Classe de interpretação		
	Baixo	Moderado	Adequado
CBM	≤ 235	236-375	> 375
β-Glicosidase	≤ 100	101-185	> 185
Sulfatase	≤ 45	46-105	> 105
Fosfatase Ácida	≤ 660	661-940	> 940

¹ Valores de C da biomassa microbiana expressos em mg de C/kg de solo; valores de atividade de β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de *p*-nitrofenol/kg de solo/h.

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2018).

Assim foi gerada a terceira tabela de interpretação (Tabela 7), que atende o conceito de amostra de solo Fertbio. Essa tabela não faz diferenciação entre plantio direto e plantio convencional e é específica para amostras de solos coletadas após a colheita das culturas (pós-colheita) e secas ao ar.

Tabela 7. Classes de interpretação de bioindicadores para Latossolos Vermelhos argilosos de cerrado, sob cultivos anuais, na camada de 0 cm a 10 cm, utilizando o conceito Fertbio: específica para amostras de solo coletadas na fase de pós-colheita e secas ao ar.

Bioindicador ¹	Classe de interpretação		
	Baixo	Moderado	Adequado
CBM	≤ 152	153-324	> 325
β-Glicosidase	≤ 66	67-115	> 116
Sulfatase	≤ 30	31-70	> 71
Fosfatase Ácida	≤ 263	264-494	> 495

¹ Valores de C da biomassa microbiana expressos em mg de C/kg de solo; valores de atividade de β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de p-nitrofenol/kg de solo/h. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2018).

Bioanálise do solo: como utilizar

Nas tabelas de recomendação de nutrientes, pela comparação dos valores obtidos na análise de uma amostra de solo com aqueles das faixas de teores estabelecidos experimentalmente, atribui-se o grau de fertilidade. Posteriormente, para cada cultura e tipo de solo, define-se a quantidade de nutrientes ou de corretivos a ser aplicada. De forma análoga, além de estabelecer os valores de referência para os bioindicadores nos Latossolos Vermelhos do Cerrado, o objetivo das tabelas de interpretação dos bioindicadores é o de auxiliar com relação à tomada de decisões sobre diferentes sistemas de manejo e/ou práticas de uso da terra e de seus impactos na qualidade do solo. Por exemplo, um valor de teste “baixo” para os indicadores microbianos pode ser um indício de que práticas de manejo inadequadas estejam sendo utilizadas. Para cada bioindicador, esses limites críticos também podem ser entendidos como os valores desejáveis que devem ser mantidos para o funcionamento normal do solo.

Utilizando como exemplo os dados da bioanálise do solo do experimento de sistemas de produção da Fundação MT (Tabela 4), é interessante comparar os resultados dos dois tratamentos (soja/pousio e soja/braquiária, ambos em PD) com os valores para interpretação dos bioindicadores (Tabela 5). Verifica-se que, no tratamento com braquiária, todos os valores dos bioindicadores se enquadram nos níveis moderado/adequado. Por outro lado, todos os valores dos bioindicadores do tratamento soja/pousio se enquadram nos níveis considerados baixos.

Em termos de aplicação prática, o conhecimento e uso da bioanálise de solo pelos agricultores serão importantes tanto para incentivar aqueles que já estão adotando sistemas de manejo conservacionistas que propiciem elevado aporte de resíduos vegetais ao solo, quanto para alertar agricultores que utilizam sistemas de manejo que possam levar à degradação do solo. Isso pode ser ilustrado se extrapolarmos a situação observada no experimento da Fundação MT, para condições de fazenda (Figura 5). Ou seja, ao invés de dois tratamentos em um experimento de campo, teríamos dois agricultores cujos solos de suas fazendas seriam quimicamente semelhantes. Entretanto, o agricultor A realiza um manejo de solo degradador de sua qualidade (monocultivo de soja ainda que sob mínimo revolvimento de solo) e o agricultor B realiza um manejo conservacionista em que a soja é sucedida pela braquiária (também sob mínimo revolvimento de solo).

A bioanálise do solo pode ser comparada a um exame de sangue, em que, por meio da determinação de vários parâmetros, podemos avaliar como está nosso estado de saúde. Dessa forma, a bioanálise serve como instrumento para alertar agricultores que utilizam sistemas de manejo que degradam o solo, despertando a vontade de mudar esse tipo de manejo, por meio da adoção de práticas conservacionistas. Esse alerta é reforçado sensivelmente quando se demonstra que a negligência com a maquinaria biológica do solo, cedo ou tarde, resulta em expressivas perdas de produtividade. Da mesma forma, para agricultores que já adotam sistemas de manejo conservacionistas, a bioanálise serve como um incentivo e estímulo, já que, muitas vezes, os aumentos de matéria orgânica, principalmente nos solos tropicais argilosos, levam mais tempo para serem observados e, geralmente, não são muito expressivos.

Tabela de interpretação para SPD

Indicador	Classes de Interpretação		
	Baixo	Moderado	Adequado
Biomassa Microbiana	≤ 245	246 a 440	> 441
β - Glucosidase	≤ 90	91 a 225	> 225
Sulfatase	≤ 25	26 a 145	> 146
Fosfatase Ácida	≤ 700	701 a 1260	> 1260

Resultado da análise de solo A

Indicador	Soja Pousio
Biomassa Microbiana	131
β - Glucosidase	62
Sulfatase	28
Fosfatase Ácida	589



Solo c/ baixa atividade biológica = solo menos produtivo

Resultado da análise de solo B

Indicador	Soja Braquiária
Biomassa Microbiana	410
β - Glucosidase	233
Sulfatase	223
Fosfatase Ácida	1.005



Solo c/ alta atividade biológica = solo mais produtivo

Figura 5. Exemplo do uso da bioanálise do solo, como suporte para tomada de decisão de manejo por agricultores.

Bioanálise do solo: como amostrar o solo

Com o advento do conceito Fertbio, os procedimentos para a amostragem de solo, visando sua bioanálise, são semelhantes aos adotados quando o solo é coletado para análises químicas.

Para os Latossolos argilosos, a coleta de solo pode ser efetuada no fim do período chuvoso, após a colheita das culturas coincidindo com a amostragem para química de solo (quando o solo ainda apresenta alguma umidade, o que facilita a amostragem). Um aspecto muito importante é que a camada diagnóstica para a bioanálise de solo é a profundidade de 0 cm a 10 cm.

Em áreas sob cultivos anuais, sugere-se preparar um sarrafo de madeira (semelhante a uma régua) com uma marca no centro e duas ou três marcas equidistantes para cada lado. A distância entre as marcas varia em função da cultura e do seu espaçamento. O importante é que a marca central coincida com um ponto de coleta no centro da linha e as demais cubram até a metade do espaçamento da entrelinha. Cada conjunto de amostras (linha e entrelinha) constituiu um ponto de amostragem. A quantidade de pontos de

amostragem deve ser representativa do tamanho da área/gleba amostrada. Exemplo: milho no espaçamento de 75 cm, preparar um sarrafo (régua) de 80 cm, com sete pontos, espaçados de 12,5 cm; o ponto central fica na linha de plantio; o primeiro ponto (à esquerda ou à direita) representa uma distância de 12,5 cm a partir do centro da linha de plantio e assim sucessivamente. Para culturas com espaçamento de 50 cm, utilizar um sarrafo de 60 cm, com cinco pontos espaçados de 12,5 cm, sendo o ponto central localizado na linha de plantio.

Bioanálise do solo: quais parâmetros devem ser avaliados

No rol de características desejáveis para a seleção de bioindicadores que possam ser utilizados nas análises de rotina, podemos listar: precisão, coerência, sensibilidade, simples determinação analítica, estarem ligados à ciclagem da matéria orgânica do solo, não serem influenciados pela aplicação de adubos e que envolvam o uso de reagentes baratos e fora da lista de controle do Exército. Além dessas características, a inclusão de aspectos, tais como, adequação à amostragem após a colheita das culturas e aos procedimentos adotados no pré-tratamento das amostras de solo para as análises de fertilidade, deve ser levada em consideração.

Nos 20 anos de estudos com bioindicadores na região dos cerrados, em todos os experimentos/fazendas avaliados, as enzimas arilsulfatase e β -glicosidase foram os indicadores que consistentemente apresentaram maior sensibilidade para detectar alterações no solo, em função do sistema de manejo. Além disso, essas enzimas também atendem aos demais critérios mencionados acima, principalmente os de adequação ao conceito Fertbio de amostragem de solo (Figura 6). Como citado anteriormente, na região do Cerrado, nem sempre o CBM é capaz de detectar diferenças entre sistemas de manejo contrastantes (Peixoto et al., 2010; Silva et al., 2010, Mendes et al., 2016). Além da baixa sensibilidade, aspectos metodológicos relacionados à determinação desse parâmetro não o tornam uma opção atrativa para adoção pelos laboratórios comerciais.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é que, diferentemente do CBM (que é a fração viva da MOS) e da respiração basal (bioindicador fortemente

influenciado por adições recentes de material carbonado ao solo), a atividade enzimática total de um solo é o somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (plantas, microrganismos e animais) e das enzimas abiônicas (enzimas associadas à fração não viva, que se acumulam no solo protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica). Por isso, as enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, tendem a se comportar de modo mais semelhante a MOS, constituindo-se em verdadeiras impressões digitais dos sistemas de manejo aos quais o solo foi submetido, permitindo, dessa forma, acessar a “memória do solo” (Figura 6). Por todas essas razões, a Embrapa Cerrados recomenda o uso dessas enzimas para a realização de bioanálises de solo.

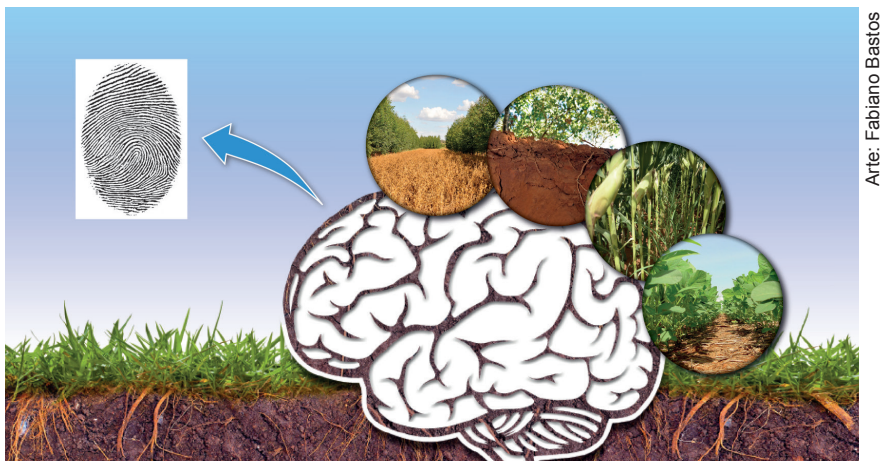


Figura 6. O solo guarda em sua “memória” os efeitos dos sistemas de manejo.

Considerando a elevada correlação entre vários atributos microbiológicos (Chaer; Tótola, 2007), a seleção de um número reduzido de indicadores robustos, capazes de expressar a qualidade biológica dos solos e cujos procedimentos analíticos sejam economicamente viáveis, torna a adoção da bioanálise pelos laboratórios comerciais uma perspectiva atraente. Nesse sentido, para bioanálises de qualidade dos Latossolos de Cerrado a recomendação da arilsulfatase e da β -glicosidase (Figura 7) coloca o Brasil na vanguarda mundial desse assunto ao possibilitar a inclusão de métricas para atestar que o crescimento agrícola com sustentabilidade é, de fato, uma grande oportunidade para o nosso país.

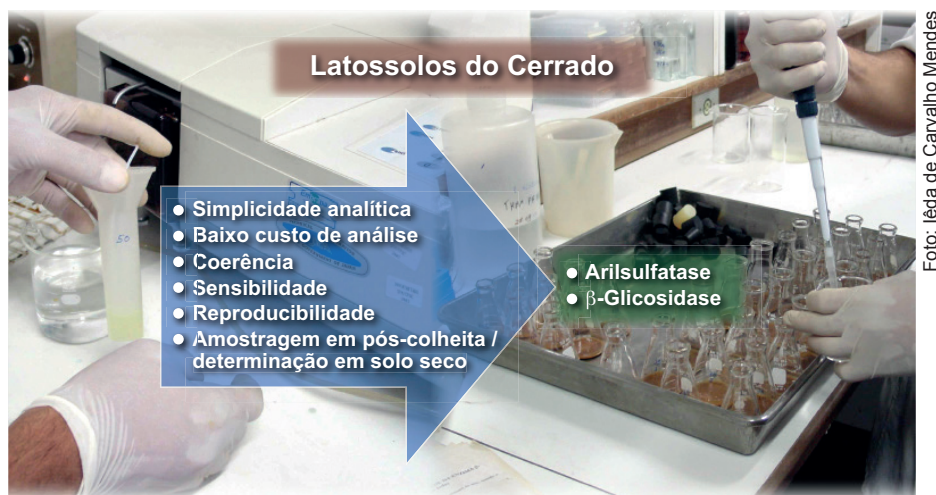


Figura 7. Características das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase que possibilitaram sua inclusão em análises comerciais para avaliação da saúde do solo.

Perspectivas futuras e considerações finais

Nos últimos 40 anos, com a incorporação dos solos do Cerrado ao processo agrícola, o Brasil desenvolveu uma agricultura tropical única no mundo. Essa agricultura é moderna, avançada e baseada em ciência.

O número crescente de produtores que percebem, no dia a dia de suas lavouras, que os aumentos de produtividades das culturas vão muito além do uso de fertilizantes e pesticidas, demonstra a importância do funcionamento biológico do solo. A adoção de sistemas de manejo e práticas agrícolas que favoreçam a saúde do solo, como o sistema de plantio direto, a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura e integração lavoura/pecuária, são o caminho natural para a obtenção de solos biologicamente ativos e produtivos. Como forma de avaliar e atestar a saúde do solo, nosso grupo de pesquisa tem se empenhado no estabelecimento de bases robustas que permitam que as análises microbiológicas façam parte das rotinas de análises de solo no Brasil (Figura 8).

Para os Latossolos argilosos de cerrado, solos que ocupam em torno de 40 milhões de hectares da região do Cerrado, já dispomos de três tabelas de

interpretação (Tabelas 5, 6 e 7). No presente momento, vários estudos já estão em andamento, visando a elaboração de novas tabelas para diferentes regiões do país, diferentes tipos de solo (como os solos arenosos e de textura média) e até mesmo diferentes sistemas de manejo (pastagens e cultivos perenes e semiperenes). A validação dos parâmetros microbiológicos como indicadores de sustentabilidade dos sistemas de produção só aumenta nossa convicção de que o futuro da nossa agricultura cada vez mais depende também do componente biológico.

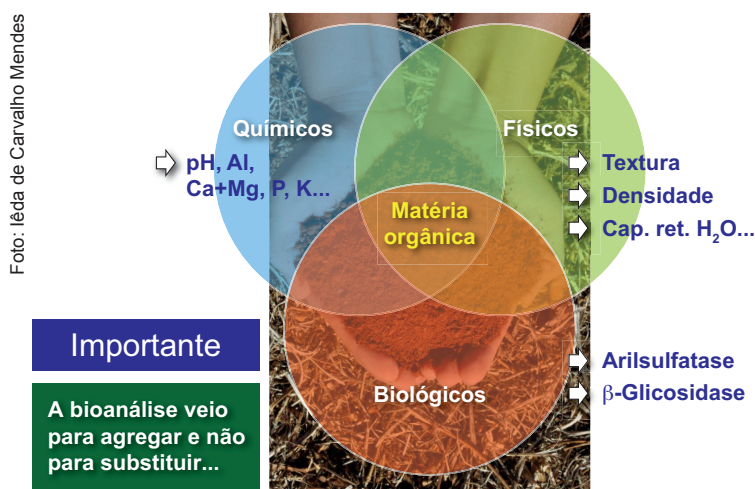


Figura 8. A inclusão dos indicadores microbiológicos nas análises de solo, permitirá um avanço significativo no conhecimento sobre o funcionamento biológico dos solos tropicais.

Até recentemente, a presença de bioindicadores que ajudassem a avaliar a saúde dos solos ainda não fazia parte das rotinas de análises de solo. Essa ausência do componente biológico nas análises de rotina de solo ocorria não só no Brasil, mas na maioria dos países do mundo. A adoção da bioanálise de solo permitirá que o agricultor possa monitorar a “saúde” de seu solo sabendo exatamente o quê avaliar, como avaliar, quando avaliar e como interpretar o que foi avaliado. Além de colocar o Brasil na vanguarda mundial, a adoção da bioanálise como parte das rotinas de análise de solo, também aumentará a inserção do Brasil na bioeconomia. Com o uso dos bioindicadores como parte das métricas para avaliações de qualidade de solo, agricultores que investem

em boas práticas de manejo poderão comprovar que, além dos alimentos que produzem, também prestam um importante serviço ambiental preservando ou melhorando a qualidade do solo. Isso sem mencionar os benefícios advindos da constatação de que solos saudáveis também são mais produtivos e resilientes. Um processo em que todos saem ganhando: o agricultor, a sociedade e o meio-ambiente.

Agradecimentos

Aos funcionários do laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados (Clodoaldo A. de Sousa, Lucas F.L.S. Rolim), aos técnicos agrícolas Osmar T. Oliveira e Valmir V. de Sousa, a todos os estudantes de graduação e pós-graduação, à Fundação MT (FMT) e aos pesquisadores/professores Vinicius Benites (Embrapa Solos), Jeander Oliveira Caetano (FESURV), Leandro Zancanaro (FMT), Fábio Ono (FMT) e Claudinei Kappes (FMT). A autora agradece o auxílio de bolsas e financiamento de projetos pela Embrapa (Projeto Bioindicadores - MP2), CNPq (Edital de Redes REPENSA, Processo: 562433/2010-4, Edital Universal), FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Distrito Federal) e MCTI/CNPq/CAPES/FAPS (INCT-MPCPAgro).

Referências

BALOTA, E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI, A.; ANDRADE D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 35, p. 300-396, 2004.

BENITES, V. M.; CAETANO, J. O.; FERREIRA FILHO, W. C.; MENEZES, C. C. E.; POLIDORO, J. C.; OLIVEIRA, R. P.; WIENDL, T. Influence of brachiaria (*Urochloa brizantha*) as a winter cover crop on potassium use efficiency and soybean yield under no-till in the Brazilian Cerrado. **The Electronic International Fertilizer Correspondent (e-ifc)**, n. 39, p. 24-35, Dec. 2014.

CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma plantios eucalipto sobre indicadores qualidade solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1381-1396, 2007.

FAO. **Status of the World's Soil Resources**: Main Report. Rome, 2015. 648 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

GREEN, V. S.; STOTT, D. E.; CRUZ, J. C.; CURI, N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. **Soil & Tillage Research**, New York, v. 92, p. 114-121, 2007.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; CRUSE, R. M. Soil: the forgotten piece of the water, food, energy nexus. **Advances in Agronomy**, v. 143, p. 1-46, 2017.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R.A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 42, p. 288-296, 2009.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa- MG, v. 36, p. 45-55, 2012.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 461-472, 2013.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72-82, 2018.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 27, p. 425-433, 2003.

MENDES, I. C. Indicadores biológicos de qualidade de solo em sistemas de plantio direto no Brasil: estado atual e perspectivas futuras. In: MOREIRA, F. M. S.; KASUYA, M. C. M. (Ed.). **Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologia para todos**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 12, p. 297-322, 2016.

MENDES, I. C.; CAETANO, J. O. ; HERNANI, L. C. ; REIS JUNIOR, F. B.; BENITES, V. M. Soil enzymes activities in Cerrado's grain-crops farming systems with Brachiaria. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. **Towards sustainable intensification: proceedings**. Brasília, DF: Embrapa, 2015b.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 32, p. 191-209, 2015a.

MENDES, I. C.; SOUZA L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; REIS JÚNIOR, F. B.; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. C. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**. Article in press. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. V.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Biological properties of aggregates from a Cerrado oxisol under conventional and no-till management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 27, p. 435-443, 2003.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; KAPPES, C.; ONO, F. B.; SEMLER, T. D.; ZANCANARO, L.; LOPES, A. A. C. **Qualidade biológica do solo: por que e como avaliar**. Rondonópolis: Fundação MT, 2017. p. 98-105. (Boletim de Pesquisa da Fundação MT, v. 1).

PEIXOTO, R. S.; CHAER, G. M.; FRANCO, N.; REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C.; ROSADO, A. S. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial

community structures of soils in the Cerrado. **Antonie van Leeuwenhoek**, Berlin, v. 98, n. 3, p. 403-413, 2010.

SCHLOSS, P. D.; HANDELSMAN, J. Toward a census of bacteria in soil. **Plos Computational Biology**, San Francisco, v. 2, n. 7, p. 786-793, 2006.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under different soil and crop managements in short- to long-term experiments performed in Brazil. **Field Crops Research**, Netherlands, v. 119, p. 20-26, 2010.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J.; STOTZKY, D. G. (Ed.). **Soil biochemistry**. New York: M. Dekker, 1990. p. 357-396.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARNEIRO, M. A. C.; MARTINS, A. P.; BAYER, C. Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, New York, v. 139, p. 28-36, 2014.

Exemplar desta publicação
disponível gratuitamente no link:
<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/?initQuery=t>

Embrapa Cerrados
BR 020 Km 18 Rod. Brasília/Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970, Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
Fax: (61) 3388-9879
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

1ª edição
1ª impressão (2018):
30 exemplares

Impressão e acabamento
Embrapa Cerrados



Comitê Local de Publicações

Presidente

Marcelo Ayres Carvalho

Secretária-executiva

Marina de Fátima Vilela

Membros

Alessandra Silva Gelape Faleiro,

Cícero Donizete Pereira, Gustavo José Braga,

João de Deus G. dos Santos Júnior,

Jussara Flores de Oliveira Arbues,

Maria Edilva Nogueira,

Shirley da Luz Soares Araújo

Supervisão editorial

Jussara Flores de O. Arbues

Revisão de texto

Jussara Flores de O. Arbues

Normalização bibliográfica

Shirley da Luz Soares Araújo

Projeto gráfico da coleção

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica

Wellington Cavalcanti

Foto da capa

Fabiano Bastos